

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**ПРОГРАМА, МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ТА
КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДО КУРСУ
«ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА В
ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ»**

**для студентів спеціальності 7.090505
усіх форм навчання**

**Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету
протокол № 1 від 02. 04. 09.**

Харків НТУ «ХПІ» 2010

Програма, методичні вказівки та контрольні завдання до курсу «Захист навколишнього середовища в теплоенергетиці» для студентів спеціальності 7.090505 «Котли і реактори» усіх форм навчання / Уклад.: Гончаренко Л.В., Тютюник Л. І. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 44 с.

Укладачі: Л. В. Гончаренко
Л. І. Тютюник

Рецензент В. Я. Горбатенко

Кафедра парогенераторобудування

ВСТУП

Енергетика є основним рушійним чинником розвитку всіх галузей промисловості, комунального і сільського господарства, служить базою підвищення продуктивності і добробуту населення. Вона має найбільш високі темпи розвитку і масштаби виробництва. Саме тому темпи науково-технічного прогресу і поліпшення умов праці значною мірою визначаються станом енергетики і у всіх країнах світу їй приділяється величезна увага.

На сучасному етапі розвитку енергетики дуже важливою стає проблема її взаємодії з навколишнім середовищем. Екологічні умови функціонування енергетики пов'язані з унікальними масштабами матеріальної і теплової взаємодії з біосферою (атмосферою, гідросферою, літосферою). Це обумовлено тим, що, споживаючи величезну кількість первинних ресурсів у вигляді твердого, рідкого і газоподібного палив, енергетика разом з виробництвом електричної енергії і теплоти викидає в навколишнє середовище велику кількість відходів у вигляді газоподібних і твердих продуктів згорання. Відповідно до існуючих термодинамічних циклів ТЭС в навколишнє середовище надходить більше 60 % потенційної енергії палива: фізична теплота, що втрачається з відхідними газами, теплота нагрітої води. Крім цього, вироблені на ТЕС і АЕС електроенергія і теплота в процесі їх передачі і споживання також надходять у навколишнє середовище.

Слід зазначити також, що у зв'язку з розвитком ядерної енергетики відбулася зміна у взаємодії енергетики з навколишнім середовищем у бік зниження забруднення навколишнього середовища продуктами згорання і золошлаковими відходами, але при цьому виникли викиди АЕС, не менш небезпечні за впливом на біосферу, ніж викиди ТЕС.

Оскільки органічне паливо поки що є основним джерелом виробництва електроенергії і теплоти, то для запобігання збільшенню викидів шкідливих домішок необхідні істотні витрати засобів і сил для розробки і впровадження економічно прийнятних способів охорони навколишнього середовища.

Важливою стороною проблеми взаємодії енергетики і навколишнього середовища є і все більш зростаючий зворотний вплив – навколишнє середовище диктує умови ухвалення технічних рішень при проектуванні підприємств енергетики: вибір типу і одиничних потужностей енергетичного устаткування, вибір місця будівництва ТЕС, ГЕС, АЕС та ін.

Необхідно відзначити, що проблема захисту навколишнього середовища від шкідливих викидів енергетики а також інших галузей промисловості за своїми масштабами є як національною, так глобальною, оскільки поширення викидів не має меж. Тому при ООН, МІРЕК і інших міжнародних організаціях створені спеціальні органи для вивчення, обговорення, аналізу екологічних проблем і укладення міжнародних договорів.

Таким чином, на сучасному етапі розвитку енергетики проблема її взаємодії з навколишнім середовищем є вельми гострою, багатобічною і

вимагає особливої уваги. Надзвичайно гостро стоїть ця проблема в енергетиці України, сучасний стан і перспективи розвитку якої наведені в [1].

1. ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Вивчення дисципліни «Захист навколишнього середовища в тепло-енергетиці» є важливим етапом підготовки фахівців в області парогенераторобудування. Мета вивчення – підготовка студентів до використання одержаних знань і навичок на стадії дипломного проектування і в подальшій професійній діяльності. Задача вивчення дисципліни – знайомство студентів з проблемами охорони навколишнього середовища, що виникають в тепло-енергетиці, із законодавством України і нормативами в області захисту навколишнього середовища, з основними сучасними методами і способами зниження шкідливих викидів в навколишнє середовище, набуття умінь і навичок у проведенні розрахунків концентрацій шкідливих речовин і рішенні практичних задач щодо їх зниження.

Вивчення дисципліни неможливе без знання вищої математики, фізики, хімії, технічної термодинаміки, тепломасообміну, теорії горіння палив, конструкцій енергетичних і енерготехнологічних агрегатів. Базою екологічної підготовки при цьому є знання і навички, які були одержані студентами в результаті вивчення на 3-му курсі дисципліни «Основи екології».

Відповідно до діючого навчального плану спеціальності 7.090505 «Котли і реактори» вивчення дисципліни здійснюється на п'ятому курсі. Студентам денної форми навчання планується 30 годин лекційних занять і 15 годин практичних занять. Студентам заочної форми навчання – відповідно 20 годин і 6 годин, самостійна робота складає 63 години і виконується одна контрольна робота. Підсумковий контроль – іспит.

У зв'язку з тим, що в дисципліні «Допоміжні системи котлів і реакторів» студенти вивчають теоретичні основи золоуловлювання і виконують курсову роботу з проектування газовідвідного тракту котла і вибору золоулавлювальних пристроїв, навчальна програма цієї дисципліни передбачає вивчення різних методів, направлених на зниження викидів двох основних забруднювачів біосфери, що генеруються при спалюванні палива в котельних агрегатах: оксидів азоту і сірчистих з'єднань. При цьому основний пріоритет надається конкретним технологічним схемам і пристроям.

У програму дисципліни не включені також питання, які пов'язані з очищенням стічних вод і викидів АЕС, через те, що вони розглядаються в спеціальних курсах.

Оскільки студентам заочної форми навчання доводиться вивчати дисципліну самостійно (за винятком установчих занять), то їм слід дотримуватися наступних рекомендацій:

– вивчення вести систематично і послідовно за темами відповідно до програми, створюючи стислий конспект, яким зручно користуватися при повторенні матеріалу і підготовці до іспиту;

– при вивченні теоретичного матеріалу і особливо при рішенні задач необхідно звертати особливу увагу на розмірності величин, що зустрічаються, оскільки вони відображають фізичний сенс процесів, що відбуваються;

– переходити до вивчення наступної теми тільки після повного засвоєння матеріалу попередньої теми, тобто після того, як знайдені відповіді на всі питання для самоперевірки;

– якщо при вивченні дисципліни виникають питання, на які студентам важко відповісти самостійно, то слід звернутися за письмовою або усною консультацією до викладача.

Вимоги, що ставляться на іспиті – знання теорії і фізичної суті процесів, що відбуваються, а також уміння застосовувати основні теоретичні положення до рішення практичних задач.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Энергетика и охрана окружающей среды / под ред. Н. Г. Залогина, Л. И. Кроппа и Ю. М. Кострыкина. – М.: Энергия, 1979.
2. Рихтер Л. А. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций. /Л.А. Рихтер. – М.: Энергоиздат, 1981.
3. Скалки Ф. В. Энергетика и окружающая среда / Ф.В. Скалки – Л.: Энергоиздат, 1981.
4. Безгрешнов А. Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах : учеб. пособие для вузов / А.Н. Безгрешнов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973.
6. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1977.
7. Родионов А. И. Техника защиты окружающей среды. / А.И. Родионов. – М.: Химия, 1989.

2. ПРОГРАМА І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ТЕМ ДИСЦИПЛІНИ

2.1. Вступ

Програма

Масштаби шкідливих забруднень навколишнього середовища в теплоенергетиці. Сучасний стан енергетики України, проблем і завдань,

пов'язаних із захистом навколишнього середовища. Законодавство і нормативні акти України, що регламентують викиди оксидів азоту і сірки, існуючим і знов проєктованим устаткуванням ТЕС. Модель взаємодії ТЕС і навколишнього середовища. Завдання фахівців в області охорони навколишнього середовища.

Методичні вказівки

В процесі вивчення цієї теми необхідно з'ясувати, що, не дивлячись на величезні масштаби викидів шкідливих речовин, теплові електростанції не є основними забруднювачами навколишнього середовища. Їх внесок складає не більше 30 % від сумарних викидів у навколишнє середовище суб'єктами народного господарства України. Слід врахувати також, що нормативи викидів оксидів азоту і сірчистих з'єднань, які наведені в Постанові Кабінету міністрів України, носять тимчасовий характер.

Питання для самоконтролю

1. Які масштаби споживання органічного палива в світі і в Україні?
2. Як розподіляється потреба в паливі за галузями промисловості в світі і в Україні?
3. Які показники сучасного стану охорони навколишнього середовища і проблеми, що виникають на ТЕС України?
4. Якими основними чинниками характеризується взаємодія ТЕС і навколишнього середовища?
5. Які значення гранично-допустимих концентрацій (ГДК) оксидів азоту і сірчистих з'єднань?
6. Чому при розрахунку висоти димарів враховується сумарна дія оксидів азоту і діоксиду сірки на навколишнє середовище?
7. Які граничні показники концентрації оксидів азоту і діоксиду сірки у викидах існують для знов проєктованих котлоагрегатів з урахуванням їх одиничної теплової потужності і виду палива?

2.2. РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ І ХІМІЧНІ МЕТОДИ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ

2.2.1. Утворення оксидів азоту при спалюванні енергетичних палив на ТЕС

Програма

Характеристика оксидів азоту (NO_x) як шкідливих викидів. Оцінка їх дії на природу, тваринний світ і людину. Джерела і механізм утворення оксидів азоту в топках котлів. Основні чинники, що істотно впливають на генерацію оксидів азоту.

Методичні вказівки

Оксиди азоту є значно шкідливою домішкою: навіть при мінімальних дозах у повітрі вони дратівливо впливають на органи дихання, окисляють атмосферні опади, руйнують устаткування і матеріали, спричиняють утворення смогів і погіршення прозорості атмосфери (фотохімічне забруднення), виснажують озоновий шар. Слід звернути увагу на той факт, що оксиди азоту можуть утворюватись при спалюванні всіх видів палива. З усіх можливих оксидів азоту найбільш токсичним є NO_2 і причому NO_2 вчетверо токсичніше за NO .

Основними джерелами утворення оксидів азоту є молекулярний азот дутьового повітря і азотовмісні компоненти палива. У зв'язку з цим прийнято ділити оксиди азоту на повітряні і паливні. Повітряні, у свою чергу, можна розділити на термічні і так звані «швидкі». Термічні оксиди азоту інтенсивно утворюються при високих температурах (понад 1540°C). «Швидкі» оксиди азоту генеруються в зоні порівняно низьких температур з утворенням проміжних вуглецевих сполук CN і HCN і подальшим швидким їх окисненням до NO .

Необхідно уважно розібратися в складних хімічних реакціях, що протікають при утворенні трьох наведених вище видів оксидів азоту, і оцінити вплив таких параметрів, як коефіцієнт надлишку повітря в топці, температура в зоні горіння палива і час перебування газів у котлі. Звернути увагу на численні чинники, що визначають процес згоряння палива в топці котла з погляду утворення оксидів азоту.

Питання для самоконтролю

1. Які оксиди азоту Ви знаєте? Охарактеризуйте їх з погляду токсичності.
2. Як протікають хімічні реакції утворення паливних оксидів азоту?
3. Як протікають хімічні реакції утворення термічних оксидів азоту?
4. Як протікають хімічні реакції утворення «швидких» оксидів азоту?
5. Які кількісні співвідношення між різними видами оксидів азоту, що утворюються при горінні палив?
6. Чому концентрація оксидів азоту визначається в перерахунку на NO_2 ?
7. Концентрація якого оксиду азоту при згоранні палив у котлі має переважне значення в порівнянні з іншими?
8. Які чинники враховує формула, що запропонована Я. Б. Зельдовічем для визначення концентрації діоксиду азоту?
9. Як врахував складну залежність концентрації NO_x від багатьох чинників, що впливають на процес горіння, І. Я. Сигал?

10. Які орієнтовні значення концентрацій оксидів азоту, що генеруються в котельних агрегатах різної потужності при спалюванні газоподібних, твердих і рідких палив?

2.2.2 Технологічні і режимні (топкові) методи зниження концентрацій оксидів азоту (C_{NO_x})

Програма

Сучасні досягнення в області застосування топкових методів зниження C_{NO_x} в котельних агрегатах. Ефективність різних технологічних і режимних заходів: зменшення коефіцієнта надлишку повітря, рециркуляція продуктів згорання, ступінчате спалювання палива, зменшення одиначної потужності пальникових пристроїв, застосування двоосвітніх екранів, подача води і пари в зону горіння палива, зменшення температури підігріву повітря, зниження навантаження котла, застосування спеціальних пальникових пристроїв з низьким виходом NO_x . Поєднання різних топкових методів.

Методичні вказівки

При вивченні цієї теми слід засвоїти, що для зниження концентрацій NO_x необхідно: понизити температурний рівень в зоні горіння палива, зменшити в ній концентрацію кисню, розтягнути факел по висоті топки котла і скоротити час перебування газів у зоні високих температур. Для реалізації цього в котельних агрегатах застосовуються вищеперелічені в програмі даної теми заходи.

Зменшення коефіцієнта надлишку повітря при спалюванні всіх видів палива призводить до зниження викидів оксидів азоту на 15–20 %. Для організації процесу горіння з низькими коефіцієнтами надлишку повітря необхідно виключити присмокти повітря в топку, що можна здійснити за рахунок застосування газощільних екранів.

Рециркуляція продуктів згорання палива в топку з температурою 300–400 °С в кількості 15–20 % дозволяє на 40–50 % зменшити концентрацію NO_x .

Стадійне (двох-, трьохстадійне) спалювання палива – найбільш радикальний спосіб зниження C_{NO_x} . При цьому в первинну зону горіння (нижню частину топки) подається кількість повітря, яка менше теоретично необхідної, внаслідок чого відбувається неповне згорання палива з частковою його газифікацією при зниженій температурі факела. У вторинну (або третинну) зону подається решта повітря або збіднена паливо-повітряна суміш для забезпечення повноти згорання палива. Така технологія спалювання палива дає можливість в 2–2,5 рази зменшити викиди NO_x .

Установка більшої кількості пальників меншої потужності в декілька ярусів і застосування двоосвітніх екранів, дозволяють розтягнути зону горіння по висоті топки і тим самим понизити C_{NO_x} .

Впорскування води і пари в зону горіння в кількості 5–10 % від витрати дугтьового повітря дає можливість понизити на 10–12 % викиди NO_x , але призводить до збільшення об'єму продуктів згорання і відповідно до зростання втрат теплоти з відхідними газами.

Зменшення температури підігріву повітря обмежене із-за небезпеки погіршення процесу горіння палива.

Зниження навантаження котла виправдане лише у разі наявності несприятливих метеорологічних умов, оскільки призводить до зменшення його ККД.

Застосування спеціальних пальникових пристроїв, з низьким виходом NO_x у зв'язку із заміною турбулентного сумішоутворення на прямоточне і організацією ступінчатого спалювання палива в них, дає можливість понизити C_{NO_x} на 25–40 %.

Слід зазначити, що одночасне застосування рециркуляції продуктів згорання із стабільним спалюванням палива при низьких значеннях коефіцієнта надлишку повітря дозволяє істотно підвищити ефективність технологічних методів зниження C_{NO_x} .

Питання для самоконтролю

1. Чому топкові методи широко впроваджуються при проектуванні нових і модернізації існуючих котлів?
2. Яка небезпека виникає при зменшенні коефіцієнта надлишку повітря нижче за граничне значення?
3. Як змінюється C_{NO_x} при зміні коефіцієнта надлишку повітря?
4. Який характер зміни C_{NO_x} із збільшенням температури факела у відновній ($\alpha < 1$) і окислювальній ($\alpha > 1$) зонах горіння?
5. Як змінюється температура факелу за висотою топки при рециркуляції продуктів згорання палива? Порівняйте з аналогічною зміною за відсутності рециркуляції.
6. Як змінюється C_{NO_x} за висотою топки при рециркуляції продуктів згорання палива і без неї?
7. Як змінюється температура факелу за висотою топки при організації двоступінчатого спалювання палива? Порівняйте з аналогічною зміною при одноступінчатому спалюванні.
8. У якій частині топки має місце відновна зона горіння при ступінчатому спалюванні палива?

9. Як змінюється C_{NO_x} за висотою топки при організації двоступінчатого спалювання палива в порівнянні з одноступінчатим?
10. Чому збільшення кількості пальників зниженої питомої потужності сприяє зниженню викидів оксидів азоту?
11. Чому зниження температури нагріву повітря є малоефективним способом зниження викидів NO_x ?
12. Яка ефективність впорскування вологи і пари в зону горіння палива, як способу зниження C_{NO_x} ?
13. Які принципи відмінності пальників з низьким виходом NO_x в порівнянні із звичайно вживаними?
14. Яка орієнтовна ефективність роздільних і спільно вживаних топкових заходів щодо зниження генерації оксидів азоту в котлах ТЕС?

2.3. Очищення продуктів згорання палива від оксидів азоту

Програма

Хімічні методи очищення продуктів згорання. Сучасні досягнення і перспективи. Абсорбція. Адсорбція. Суть каталітичних процесів газоочищення. Каталізатори і вимоги до них. Найбільш поширені методи очищення, які використовуються в теплоенергетиці.

Методичні вказівки

У зв'язку з постійним підвищенням вимог до екологічної чистоти енергетичних виробництв не завжди вдається забезпечити їх розглянутими в п.2.2.2 методами. Тому в світовій практиці все більше уваги приділяється хімічним методам очищення відхідних газів від шкідливих домішок. В основу таких методів покладені хімічні реакції відновлення або конверсії шкідливих домішок в нешкідливі продукти, як із застосуванням каталізаторів, так і без них. Слід пам'ятати, що очищення продуктів згорання від оксидів азоту стало економічно виправданим і доступним лише останніми роками. Це обумовлено тим, що в процесі очищення необхідно обробити великі об'єми газів з низькою концентрацією цього хімічно стійкого і малорозчинного у воді з'єднання. Окрім цього, стримуючими чинниками є: дорожня каталізаторів і необхідність частої їх заміни у зв'язку з отруєнням SO_2 і SO_3 , забезпечення селективності процесу відновлення, присутність в продуктах згорання реакційноздатних речовин, таких як CO_2 , SO_2 , O_2 . Це вимагає великих капітальних і експлуатаційних витрат і відповідного підвищення собівартості вироблення електроенергії і теплоти. Не дивлячись на це, останнім часом на ТЕС багатьох країн світу впроваджуються різні достатньо апробовані методи очищення продуктів згорання від NO_x . Найбільш широке застосування

одержали наступні методи: селективне некаталітичне відновлення (СНКВ), селективне каталітичне відновлення (СКВ), неселективне каталітичне відновлення (НСКВ), розклад NO_x гетерогенними відновниками. Крім цих технологій, перспективними є такі методи, як, наприклад, озонно-аміачний, електронно-променевий, каталітичний із застосуванням в якості каталізатора CuO/CuSO_4 тощо.

Питання для самоконтролю

1. Які труднощі виникають при застосуванні хімічних методів очищення продуктів згорання палива від NO_x ?
2. На яких стадіях в світі знаходяться розробка і впровадження хімічних методів очищення продуктів згорання палива від NO_x ?
3. Які процеси становлять основу хімічних методів очищення продуктів згорання палива від NO_x ?
4. Яка фізична суть адсорбційних методів очищення продуктів згорання палива? Яка їх ефективність?
5. Яка фізична суть адсорбційних методів очищення продуктів згорання палива? Які адсорбенти застосовуються?
6. Яка роль каталізаторів в процесі очищення?
7. Від яких чинників залежить активність каталізатора?
8. Які вимоги ставляються до каталізаторів?
9. Які перспективи застосування в теплоенергетиці хімічних методів очищення продуктів згорання палива від NO_x ?

2.3.1. Метод селективного некаталітичного відновлення NO_x (СНКВ)

Програма

Суть методу СНКВ. Основні хімічні реакції. Принципова технологічна схема процесу відновлення NO_x . Оцінка ефективності методу. Сучасний стан, приклади і перспективи використання методу СНКВ на ТЕС.

Методичні вказівки

Основою методу СНКВ є відновлення NO_x до N_2 і H_2O у присутності кисню і відновника – аміаку (або сечовини) в зоні високих температур ($950\text{ }^\circ\text{C} \pm 50\text{ }^\circ\text{C}$).

Основні переваги методу: можливість понизити концентрацію NO_x на 40–60 % і сумісність з процесом сіркоочищення.

Недоліки: вузький температурний інтервал процесу відновлення, проскакування аміаку в навколишнє середовище, забруднення

повітря підігрівача бісульфатом амонію, вища вартість у порівнянні з організаційно-технологічними методами.

Крім аміаку і сечовини як відновники можуть використовуватись ціанурова кислота, сульфат амонію, карбонат амонію та ін., які вводяться за допомогою пари, повітря, газів рециркуляції.

СНКВ успішно застосовується в сучасних потужних котлах, що спалюють природний газ, мазут, вугілля і побутові відходи.

Питання для самоконтролю

1. Якими хімічними реакціями супроводжується процес відновлення NO_x ?
2. Чому процес СНКВ чутливий до температурного рівня продуктів згорання в котельному агрегаті?
3. Які заходи дозволяють розширити температурний інтервал СНКВ ($950 \pm 50^\circ\text{C}$)?
4. Чи можливо застосовувати процес СНКВ сумісно з топковими методами зниження концентрації NO_x ?
5. Від яких чинників залежить ступінь відновлення NO_x ?
6. У яких випадках слід застосовувати СНКВ?
7. Який спосіб введення відновника в котельний агрегат є найбільш ефективним?

2.3.2. Метод селективного каталітичного відновлення NO_x (СКВ)

Програма

Суть методу СКВ. Хімічні реакції процесу відновлення NO_x . Чинники, що істотно впливають на СКВ. Принципова технологічна схема процесу СКВ. Оцінка ефективності методу. Сучасний стан, приклади і перспективи впровадження СКВ на ТЕС.

Методичні вказівки

СКВ здійснюється аміаком на поверхні каталізатора у присутності кисню при температурах $200 - 400^\circ\text{C}$. Як каталізатори застосовуються оксиди титану, заліза, хрому, міді і п'ятиокису ванадію, які практично не отруюються оксидами сірки.

Переваги СКВ: висока ефективність відновлення (до 95 %), нешкідливі продукти реакцій відновлення (азот і вода), витрата відновника еквівалентна вмісту NO_x за рахунок селективності процесу, низький температурний рівень процесу.

Недоліки: забруднення повітропідігрівача бісульфатом амонію, викиди в атмосферу аміаку, чутливість до температурного режиму, є проблеми з поглядом охорони навколишнього середовища при заміні і дезактивації каталізаторів, висока вартість каталізаторів (20–30 % від витрат на очищення).

Слід зазначити, що, не дивлячись на вказані недоліки і, особливо, дорожнечу методу, останнім часом СКВ дуже широко застосовується в зарубіжній енергетиці завдяки його дуже високій ефективності відновлення NO_x , що дуже важливо у зв'язку із збільшеними нормативними вимогами до захисту навколишнього середовища.

Питання для самоконтролю

1. Які хімічні реакції протікають у процесі відновлення NO_x ?
2. Яка реакція є основною і чому?
3. Якими чинниками визначається ефективність методу СКВ?
4. Чому процес СКВ чутливий до температурного рівня продуктів згорання в котельному агрегаті?
5. Які каталізатори застосовуються в процесі СКВ і чому?
6. Яким є вплив селективності процесу на витрату відновника?
7. Яка вартість методу СКВ? Від яких чинників вона залежить?
8. Як змінюється температура продуктів згорання палива на виході з котельного агрегату при застосуванні СКВ?

2.3.3. Методи неселективного каталітичного відновлення NO_x (НСКВ) і розкладання NO_x гетерогенними відновниками

Програма

Суть методу НСКВ. Хімічні процеси, що протікають при використанні різних відновників NO_x . Принципова технологічна схема процесу. Оцінка ефективності методу. Досягнення, приклади і перспективи впровадження НСКВ на ТЕС. Суть методу розкладу NO_x гетерогенними відновниками. Оцінка ефективності методу.

Методичні вказівки

Застосування НСКВ викликане спробою замінити екологічно небезпечний аміак іншими відновниками, такими як метан, природний, коксовий або нафтовий гази, оксид вуглецю, водень або азотноводнева суміш. Ці відновники діють неселективно, оскільки взаємодіють з O_2 і SO_2 , що вимагає великої їх кількості. Як каталізатори застосовують метали платинової

групи (паладій, платина, родій) або дешевші, але і менш ефективні і стабільні в експлуатації (нікель, хром, мідь, цинк, ванадій, церій і ін.).

Переваги методу: високий ступінь відновлення, відносно нешкідливі відновники.

Недоліки: велика витрата відновника, необхідність очищення відновлених газів від CO і O₂, можливість очищення газів тільки з низькою концентрацією NO_x (до 0,5 %), дорожнеча каталізаторів.

Метод розкладання NO_x гетерогенними відновниками є процесом відновлення NO_x при високих температурах (500–1300 °C), який здійснюється на твердих вуглецевмісних матеріалах: вугіллі, коксі, графіті, які одночасно виконують функції каталізатора і палива. При 800 °C ступінь відновлення NO_x на коксі може досягти 96 %, а при 1000 °C – близька до 100 %. Проте швидка втрата активності таких каталізаторів призводить до неповного відновлення оксидів азоту.

Питання для самоконтролю

1. Чому необхідно здійснювати заміну аміаку іншими відновниками?
2. Якими хімічними реакціями супроводжуються процеси відновлення NO_x в N₂ при використанні їх як відновників метану, CO₂, водню?
3. Чому потрібна велика витрата відновника?
4. Які каталізатори застосовуються в процесі НСКВ? Чому?
5. Який температурний рівень, в діапазоні якого необхідно здійснювати НСКВ?
6. Які чинники істотно впливають на ефективність НСКВ?
7. Як змінюється температура відхідних газів при використанні методу НСКВ?
8. Якими хімічними реакціями супроводжується процес відновлення NO₂ гетерогенними відновниками?
9. Який температурний рівень процесу відновлення NO_x гетерогенними відновниками?
10. Чому активність каталізатора, яким є гетерогенний відновник, швидко падає?

3. РОЗДІЛ 2. ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ СІРКИ В АТМОСФЕРУ

3.1. Проблеми і задачі, що виникають при захисті навколишнього середовища від викидів сірчистих з'єднань. Методи сіркоочищення палив до їх використання в котлах

Програма

Масштаби викидів SO_2 енергетичними підприємствами. Характеристика оксидів сірки як шкідливих викидів. Джерела утворення SO_2 в топках котлів. Класифікація методів сіркоочищення. Сучасні досягнення і перспективи у області сіркоочищення. Вилучення сірки з рідкого і твердого палив до їх спалювання. Газифікація палив як спосіб зниження концентрації SO_2 в димових газах. Видалення сірчистих з'єднань при спалюванні палива в киплячому шарі.

Методичні вказівки

У всьому світі зростають вимоги до захисту навколишнього середовища у зв'язку з прогнозом економістів про прискорений вибуховий техніко-економічний розвиток. Одними з об'єктів підвищеної уваги при цьому є сірчані з'єднання, які утворюються при спалюванні органічних палив. Збиток, що заподіюється викидами оксидів сірки, настільки великий, що в багатьох країнах здійснюються розраховані на декілька років вперед програми сіркоочищення. Дослідження і розробки останніх років в області сіркоочищення показали, що в даний час існує велика кількість процесів, здатних задовольнити різні технічні і економічні вимоги.

При вивченні теми слід засвоїти, що рішення проблеми зниження викидів з'єднань сірки при спалюванні органічного палива може бути здійснено за допомогою наступних заходів:

- 1) використання на ТЕС палив з малим вмістом сірки;
- 2) видалення сірки з палив до їх спалювання шляхом збагачення на спеціалізованих підприємствах;
- 3) видалення сірки в процесі спалювання палива;
- 4) сіркоочищення димових газів.

Перший захід – так званий метод непостійно діючої технології – передбачає, що за сприятливих метеорологічних умов на електростанції спалюється високосірчисте паливо, при несприятливих – малосірчисте.

Другий захід – залежно від виду палива може бути реалізований на різних спеціалізованих підприємствах. Знесірчення мазуту може бути здійснено на нафтопереробних заводах прямим або непрямим способом. При прямому способі нафтовий залишок піддається каталітичній гідрообробці при підвищенні температури і тиску. Непрямий спосіб сіркоочищення полягає в тому, що шляхом вакуумної перегонки мазуту відділяються летючі речовини від важких нафтових залишків. Потім ці легкі компоненти знесірчують шляхом гідроочищення і змішують з важкими. При цьому виходить котельне паливо із вмістом сірки менше 1 % за масою.

Технологія по знесірченню твердих палив полягає у відділенні сірчаного колчедану (піриту) від вугілля на вуглезбагачувальних фабриках. Щільність колчедану в 2,5 рази вище за щільність вугілля, колчедан володіє

парамагнітними властивостями. Ці властивості і використовуються в процесах сухого і мокрого збагачення вугілля. Збагачення може бути ефективним (20 – 30 %), якщо частка колчеданної сірки у вугіллі достатньо висока, як, наприклад, у підмосковному бурому вугіллі. Для знесірчення твердих палив можуть застосовуватися й інші, дорожчі способи. Наприклад, гідротермічне сіркоочищення подрібненого палива в автоклавах при температурі 225–350 °С і тиску 1,8 МПа із застосуванням лужних розчинів гідратів оксидів натрію і кальцію. Для видалення органічної сірки застосовуються різні спеціальні розчинники у присутності водню при температурах близько 450 °С і тиску 1,4 МПа.

Третій захід – здійснюється шляхом газифікації рідких і твердих палив або спалювання цих палив у киплячому шарі. При цьому як у першому, так і в другому випадку зв'язуються сірчисті з'єднання різними реагентами з подальшим отриманням товарної продукції у вигляді елементарної сірки або діоксиду сірки, які використовуються в сірчаноокислотних і інших виробництвах.

Процес газифікації твердого або рідкого палива здійснюється в спеціальних газогенераторах при неповному їх окисненні ($\alpha = 0,4\text{--}0,5$), високій температурі (900–1300 °С) і тиску від 1,5 до 10 МПа. Залежно від типу дуття (повітря, кисень, водяна пара) теплота згорання генераторного газу може коливатись у великих межах: від 4,5 до 16,5 МДж/м³. У процесі газифікації 70–72 % теплоти згорання палива переходить в теплоту згорання газу, а решта становить фізичну теплоту продуктів газифікації і втрати теплоти в навколишнє середовище. Викиди сірчистих з'єднань в навколишнє середовище в результаті використання цієї технології можна зменшити на 92–95 % шляхом уловлювання H_2S і SO_2 з подальшим перетворенням їх в товарну сірку або сірчану кислоту.

Застосування киплячого шару для спалювання сірчистих палив дозволяє приблизно на 90 % хімічно зв'язувати сірку за допомогою роздрібненого вапняку (або інших сорбентів) при температурі 750–850 °С. При цій температурі відбувається термічна дисоціація вапняку з утворенням оксиду кальцію, який вступає у взаємодію з сірчистими сполуками, утворюючи сульфат і сульфід кальцію. Для зменшення витрати вапняку і видалення сірчистого ангідриду здійснюється регенерація сірчаноокислого кальцію при температурі 1000 – 1100 °С. Регенований оксид кальцію знову подається в киплячий шар. Слід зазначити, що у зв'язку з низьким температурним рівнем процесу горіння палива істотно зменшується можливість утворення оксидів азоту.

Четвертий захід – сіркоочищення димових газів – є найбільш складним і дорогим. Це обумовлено тим, що концентрація SO_2 в димових газах відносно мала, розчинність у воді низька. Тому потрібна велика кількість дорогих реагентів і каталізатора для зв'язування діоксиду сірки, а також численне апаратне забезпечення схем сіркоочищення.

Питання для самоконтролю

1. Яка кількість SO_2 щорічно викидається ТЕС в навколишнє середовище?
2. Якого збитку навколишньому середовищу і економіці завдається викидами сірчистих з'єднань?
3. Які нормативи питомих викидів в атмосферу діоксиду сірки встановлені в Україні і Росії?
4. Які організаційно-технічні заходи необхідно здійснювати для зниження викидів сірчистих з'єднань?
5. Як здійснюється знесірчення палива на вуглезбагачувальних фабриках?
6. Які технологічні процеси по знесірченню мазуту здійснюються на нафтопереробних заводах?
7. Як змінюється ціна палива після його сіркоочищення?
8. Чому газифікація твердих і рідких палив є ефективним способом зниження викидів SO_2 в навколишнє середовище?
9. Які переваги і недоліки газифікації палив з погляду захисту навколишнього середовища від шкідливих викидів?
10. Як здійснюється зв'язування і видалення сірчистих з'єднань в процесі спалювання палива в киплячому шарі?
11. Які переваги і недоліки спалювання палива в киплячому шарі як способу зниження концентрації діоксиду сірки в продуктах згорання палива?

3.2. Сіркоочищення димових газів

Програма

Сучасний стан і досягнення в області сіркоочищення продуктів згорання палива. Класифікація найбільш ефективних методів. Абсорбційні та адсорбційні способи зв'язування сірчистих з'єднань.

Методичні вказівки

Сьогодні у світі експлуатується більше 750 установок сіркоочищення димових газів. Приблизно у 70 % цих установок використовується промивка продуктів згорання вапняною або вапняковою суспензією. Близько 20 % обладнані сухими і мокро-сухими системами з розпилом натрійових або вапняних суспензій та 10 % установок використовують інші технології.

В процесі вивчення цієї теми слід враховувати, що хімічні методи очищення відхідних з котельних агрегатів газів від шкідливих домішок є достатньо складними і високовитратними газоочисними системами. Тому їх впровадження в енергетику необхідно здійснювати лише в тих випадках, коли повністю вичерпані інші, простіші і, відповідно, дешевші методи. В той же час необхідно знати, що основними перевагами сіркоочищення димових газів є їх

безумовно висока ефективність (90–95 %) і можливість застосування практично незалежно від виду палива. Слід також мати на увазі, що в основу хімічних методів очищення покладена хімічна реакція і її роль є переважаючою над процесами абсорбції, адсорбції, конденсації або спалювання.

В даний час розроблено більше 60 способів сіркоочищення, основними з яких є: мокрі, мокро-сухі, сухі, каталітичні та інші, як, наприклад, озонно-аміачний, електронно-променевий і т.п.

Питання для самоконтролю

1. Чому останнім часом приділяється велика увага використанню хімічних методів сіркоочищення продуктів згорання палива?
2. У чому полягає суть хімічних і каталітичних методів очищення газів?
3. Які переваги і недоліки хімічних методів сіркоочищення?
4. В чому полягає суть процесів абсорбції, адсорбції, десорбції?
5. Які досягнення і перспективи в області використання технологій сіркоочищення димових газів на ТЕС?

3.2.1. Мокрі методи сіркоочищення

Програма

Вапняний і вапняковий, аміачно-циклічний, магнезитовий, содовий двоциклічний методи сіркоочищення. Ефективність, переваги і недоліки цих методів.

Методичні вказівки

В енергетиці найбільш перспективними з мокрих способів сіркоочищення є: вапняковий, магнезитовий, аміачно-циклічний, содово-циклічний. До основних їх переваг слід віднести: високий ступінь очищення, можливість одержувати товарну продукцію у вигляді сірчаної кислоти, сірки, добрив, будівельних матеріалів. Проте вони не позбавлені недоліків: великі капітальні і експлуатаційні витрати, є проблеми в забезпеченні експлуатаційної надійності, виникає необхідність у додаткових площах на території ТЕС і в підігріві очищених газів перед евакуацією їх у навколишнє середовище.

Якнайповніше розробленим і доведеним до практичного застосування процесом є вапняковий спосіб сіркоочищення. Він заснований на зв'язуванні діоксиду сірки в абсорбері дешевими лужними реагентами: гідратом окислу кальцію або карбонатом кальцію. Простота технології, високий ступінь очищення (85–95 %), недорогі реагенти і матеріали для виготовлення апаратів, відсутність підвищеного тиску і вакууму, висока надійність в експлуатації – визначили його пріоритетне застосування в енергетиці.

Питання для самоконтролю

1. Які особливості, переваги і недоліки вапнякового способу сіркоочищення?
2. Які особливості, переваги і недоліки магнезитового способу сіркоочищення?
3. Які особливості, переваги і недоліки аміачно-циклічного способу сіркоочищення?
4. Які особливості, переваги і недоліки содово-циклічного способу сіркоочищення?
5. Чому в даний час найширше в енергетиці впроваджується вапняковий спосіб сіркоочищення?
6. Які чинники і побічні ефекти стримують впровадження на ТЕС магнезитового, аміачно-циклічного і содово-циклічного способів сіркоочищення?

3.2.2. Мокро-сухі і сухі методи сіркоочищення

Програма

Досягнення і перспективи впровадження на ТЕС мокро-сухих і сухих методів сіркоочищення. Мокро-сухі технології. Сухі (адсорбційні) технології. Ефективність, переваги і недоліки мокро-сухих і сухих технологій.

Методичні вказівки

При вивченні даної теми необхідно засвоїти, що сухі і мокро-сухі способи сіркоочищення є менш витратними в порівнянні з мокрими, але при цьому і ефективність очищення нижче. Застосування сухих способів дозволяє понизити концентрацію діоксиду сірки на 25–30 %, мокро-сухих – на 40–60 %. Основу цих способів становить зв'язування сірчистих з'єднань в процесі спалювання палива шляхом подачі в топку або газоходи котла мелених, гранульованих або роздрібнених реагентів: вапна, вапняку, доломіту, солей натрію і т.п.

Питання для самоконтролю

1. У яких випадках слід застосовувати на ТЕС мокро-сухі і сухі методи сіркоочищення продуктів згорання палива?
2. Які особливості, переваги і недоліки мокро-сухих методів сіркоочищення?
3. Які особливості, переваги і недоліки сухих методів сіркоочищення?
4. Чому ефективність мокро-сухих технологій сіркоочищення вища, ніж сухих?

3.2.3. Каталітичні методи сіркоочищення димових газів

Програма

Каталітичні процеси газоочищення. Каталізатори, що, використовуються в газоочисних технологіях. Чинники, які істотно впливають на активність каталізаторів. Процес сіркоочищення шляхом окиснення SO_2 в SO_3 . Ефективність, переваги і недоліки процесу.

Методичні вказівки

Суть каталітичних процесів газоочищення полягає в конверсії призначених для знешкодження домішок в інші продукти у присутності спеціальних каталізаторів. Каталізатори не викликають зміни енергетичного рівня молекул взаємодіючих речовин і зсуву рівноваги хімічних реакцій. Їх роль зводиться до збільшення швидкостей реакцій. При цьому маса і властивості каталізаторів теоретично не повинні зазнавати ніяких змін, що на практиці не завжди дотримується, оскільки каталізатори піддаються постійній дезактивації за рахунок хімічних чинників (отруєння газами, недостатня селективність каталізатора і т.д.) і фізичних чинників (механічне зношення, спікання, агрегування). У зв'язку з цим до каталізаторів ставляться вимоги щодо їх високої активності, селективності по відношенню до конвертовуваних домішок, стійкості до механічних і термічних навантажень, вартості, низьких температур запалення. Цим вимогам відповідають каталізатори, які створені на основі благородних металів (платина, паладій, родій, срібло та ін.), оксидів марганцю, міді, кобальту, ванадію, а також оксидних матеріалів, активізованих благородними металами в кількості 1–1,5 %. Як правило, каталізатори підбираються дослідним шляхом.

Технологічний процес окиснення SO_2 в SO_3 протікає в спеціальному реакторі на ванадієвому каталізаторі при високій температурі за рахунок кисню, що міститься в продуктах згорання. Після охолодження газів і промивки їх холодною сірчаною кислотою, здійснюється уловлювання у волокнистому фільтрі H_2SO_4 85 % міцності. Ефективність сіркоочищення досягає 90 %.

Питання для самоконтролю

1. Що таке активність каталізатора, як її визначити?
2. Від яких чинників істотно залежить активність каталізатора?
3. Які вимоги до каталізаторів є суттєвими?
4. Які особливості, переваги і недоліки процесу сіркоочищення шляхом окиснення SO_2 в SO_3 ?

3.2.4. Методи, що дозволяють одночасно знижувати викиди оксидів азоту і діоксидів сірки

Програма

Каталітичний процес сіркоочищення із застосуванням CuO/CuSO_4 . Процес додаткового введення в димові гази NO_x . Електронно-променевий метод. Озонно-аміачний метод. Ефективність, переваги і недоліки цих методів. Техніко-економічне порівняння різних технологій сіркоочищення димових газів.

Методичні вказівки

Матеріали цієї теми свідчать про те, що існує ряд технологічних процесів, що дають можливість знижувати концентрацію як NO_x , так і SO_2 в продуктах згорання палива. Як приклад розглянуті наступні процеси сіркоочищення: з використанням в якості каталізатора CuO/CuSO_4 з додатковим введенням в димові гази NO_x . Ефективність таких технологій достатньо висока, вони дозволяють забезпечити 90–95 % очищення димових газів від SO_2 і 75–80 % очищення від NO_x . При цьому вони дають можливість одержувати товарну продукцію у вигляді 80 % сірчаної кислоти і 50 % азотної кислоти.

Слід звернути увагу на перспективну електронно-променеву технологію очищення димових газів ТЕС від, NO_x , SO_2 і золи, розроблену НДПІ «Енергосталь» (м. Харків) з метою впровадження на Слов'янській ГРЕС, що дозволяє на 85–95 % знизити викиди оксидів азоту і оксидів сірки і одержати товарну продукцію у вигляді амонійних добрив.

Цікавою технологією одночасного очищення димових газів від SO_2 і NO_x є озонно-аміачний метод, розроблений НДІ Теплоенергетики (м. Горлівка) спільно з ІХФ РАН. Процес передбачає окиснення оксиду азоту в газовій фазі озоном до діоксиду, після чого димовий газ зрошується розчином вапняку або аміаку в реакторі. Метод дозволяє забезпечити ступінь очищення від SO_2 90 % і від NO_x 75 %.

Наведене техніко-економічне порівняння різних технологій сіркоочищення димових газів дозволяє зробити висновок про те, що за ефективністю зв'язування SO_2 перевагу слід віддати мокрій вапнякової технології, проте ця технологія має і найвищі питомі капітальні витрати. Вартість видалення SO_2 з димових газів виявляється найбільш високою у разі використання мокро-сухої технології (при спалюванні палива із вмістом сірки від 0,5 % до 2 %).

Питання для самоконтролю

1. У чому полягає перевага методів, що дозволяють одночасно знижувати концентрацію NO_x і SO_2 в продуктах згорання палива, в порівнянні з іншими методами?
2. Які особливості, переваги і недоліки процесу сіркоочищення із застосуванням як каталізатора CuO/CuSO_4 ?
3. Які особливості, переваги і недоліки процесу сіркоочищення, що здійснюється шляхом введення NO_2 в продукти згорання палива?
4. Які особливості, переваги і недоліки електронно-променевого методу сіркоочищення?
5. Які особливості, переваги і недоліки озонно-аміачного методу сіркоочищення?
6. Як відрізняються ефективність, питомі капітальні і експлуатаційні витрати при використанні різних хімічних методів сіркоочищення продуктів згорання палива?

4. КОНТРОЛЬНА РОБОТА

Контрольна робота складається з теоретичної і практичної частин.
Номер варіанту контрольної роботи визначається викладачем.

4.1. Теоретична частина

Студенти повинні дати письмові відповіді на 4 питання, номери яких наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Номери питань до контрольної роботи

Варіант	№ питань	Варіант	№ питань
01	1,2,3,4	11	1, 11, 21, 31
02	5,6,7,8	12	2,12, 22, 32
03	9,10,11,12	13	3, 13, 23, 33
04	13,14,15,16	14	4, 14, 24, 34
05	17,18,19,20	15	5, 15, 25, 35
06	21,22,23,24	16	6, 16, 26, 36
07	25,26,27,28	17	7, 17, 27, 37
08	29,30,31,32	18	8, 18, 28, 38
09	33,34,35,36	19	9, 19, 29, 39
10	37,38,39,40	20	10, 20, 30, 40

Перелік питань

1. Наведіть модель взаємодії ТЕС з навколишнім середовищем і дайте пояснення до неї.
2. Охарактеризуйте оксиди сірки як шкідливі викиди в навколишнє середовище.
3. Масштаби викидів оксидів сірки в навколишнє середовище енергетичними підприємствами.
4. Способи очищення твердих палив від сірчистих сполук до їх спалювання.
5. Видалення сірчаного колчедану з твердого палива на вуглезбагачувальних підприємствах.
6. Зменшення концентрації сірчистих сполук у мазуті на нафтопереробних заводах.
7. Газифікація твердих палив як спосіб зниження концентрації сірчистих сполук в продуктах згорання.
8. Газифікація сірчистого мазуту.
9. Зниження концентрації сірчистих сполук шляхом спалювання палива в киплячому шарі.
10. Сіркоочищення продуктів згорання палива, коротка характеристика найбільш перспективних способів.
11. Вапняний (вапняковий) спосіб сіркоочищення продуктів згорання палива.
12. Магnezитовий спосіб сіркоочищення продуктів згорання палива.
13. Аміачно-циклічний спосіб сіркоочищення продуктів згорання палива.
14. Содово-циклічний спосіб сіркоочищення продуктів згорання палива.
15. Коротка характеристика сухих і мокро-сухих способів сіркоочищення продуктів згорання палива.
16. Введення вапняку в топку котла з метою зниження викидів діоксиду сірки.
17. Сіркоочищення продуктів згорання палива шляхом каталітичного окислення SO_2 у SO_3 .
18. Каталітичний процес сіркоочищення продуктів згорання палива з використанням в якості каталізатора CuO/CuSO_4 .
19. Переваги і недоліки вапняного (вапнякового) способу сіркоочищення продуктів згорання палива.
20. Порівняння техніко-економічних показників різних способів сіркоочищення продуктів згорання палива.
21. Характеристика оксидів азоту як шкідливих викидів в енергетиці. Основні джерела їх утворення.
22. Механізми утворення термічних, паливних і «швидких» оксидів азоту.

23. Основні чинники, які істотно впливають на утворення оксидів азоту в топках котлів.
24. Коротка характеристика і техніко-економічна оцінка технологічних (топкових) методів зниження викидів оксидів азоту.
25. Вплив коефіцієнта надлишку повітря в топці на концентрацію оксидів азоту.
26. Рециркуляція продуктів згорання палива як спосіб зниження викидів оксидів азоту.
27. Зниження концентрації оксидів азоту в продуктах згорання палива шляхом організації ступінчатого згорання палива.
28. Зменшення концентрації оксидів азоту в продуктах згорання палива шляхом впорскування конденсату і пари в топку.
29. Зменшення викидів оксидів азоту шляхом зниження температури підігріву повітря у повітряпідігрівачах.
30. Застосування ступінчатого спалювання палива в поєднанні з рециркуляцією продуктів згорання для зниження викидів оксидів азоту.
31. Застосування пальникових пристроїв із зниженою генерацією оксидів азоту.
32. Коротка характеристика і техніко-економічна оцінка хімічних способів зниження концентрації оксидів азоту в продуктах згорання палива, що покидають котельний агрегат.
33. Селективне некаталітичне відновлення оксидів азоту (СНКВ).
34. Селективне каталітичне відновлення оксидів азоту (СКВ).
35. Неселективне каталітичне відновлення оксидів азоту (НСКВ).
36. Зниження концентрації оксидів азоту в продуктах згорання палива гетерогенними відновниками.
37. Оцінка ефективності застосування найбільш поширених технологічних методів зниження концентрацій оксидів азоту в котлах.
38. Хімічні методи зниження концентрації оксидів азоту в продуктах згорання палива: безкаталітичні і каталітичні.
39. Кількісні співвідношення між термічними, паливними і “швидкими” оксидами азоту при спалюванні різних видів палива. Формула Я. Б. Зельдовича.
40. Методи і шляхи зниження викидів оксидів азоту в енергетиці.

4.1.1. Методичні вказівки до теоретичної частини контрольної роботи

При оформленні контрольної роботи необхідно повністю наводити формулювання питань. Відповіді на поставлені питання повинні бути вичерпними і супроводжуватись необхідними рисунками і схемами з

позначенням усіх елементів, пояснювальним текстом і формулами хімічних реакцій.

4.2. Практична частина (задачі)

Задача 1

Виконати розрахунок концентрації оксидів азоту, що утворюються при спалюванні різних видів палива в енергетичних котлах, і здійснити оцінку ефективності застосування технологічних і режимних заходів щодо зниження викидів оксидів азоту в навколишнє середовище. Для вирішення задачі в такій постановці необхідно:

1. Виконати розрахунок концентрацій C_{NO_2} при номінальному навантаженні котла $D_{\text{ном}}$, відсутності рециркуляції продуктів згорання в топку ($r = 0$) і відсутності ступінчатого згорання палива ($\overline{B}_1 = 1,0$; $\beta_{\text{H}} = 0$). Оцінити, як зміниться концентрація NO_2 при часткових навантаженнях, рівних: $D = 0,6 D_{\text{ном}}$, $D = 0,8 D_{\text{ном}}$ і подати графічну залежність $C_{\text{NO}_2} = f(D)$.

2. Оцінити вплив ступеня рециркуляції продуктів згорання палива, прийнявши $r = 0,1$ і $r = 0,15$ при $D_{\text{ном}}$ і відсутності ступінчастого спалювання палива ($\overline{B}_1 = 1,0$; $\beta_{\text{H}} = 0$). Побудувати графік залежності $C_{\text{NO}_2} = f(r)$.

3. Оцінити вплив двоступінчатого спалювання палива в котлі на C_{NO_2} при $D_{\text{ном}}$, $r = 0$, прийнявши в якості вихідних даних \overline{B}_1 з таблиці 4.2 і $\beta_{\text{H}} = 0,21$.

4. Оцінити спільний вплив рециркуляції продуктів згорання палива і двоступінчатого спалювання палива на C_{NO_2} при $D_{\text{ном}}$, прийнявши $r = 0$; $r = 0,1$; $r = 0,15$, \overline{B}_1 за таблицею 4.2 і $\beta_{\text{H}} = 0,21$. Побудувати графік залежності $C_{\text{NO}_2} = f(r, \text{ступ. згор.})$.

Початкові дані до задачі слід прийняти відповідно до запропонованого викладачем варіанту за таблицею 4.2.

4.2.1. Методичні вказівки до задачі 1

Методичні вказівки

До рішення задачі 1 слід приступати тільки після вивчення матеріалу підрозділу 2.2. При цьому рекомендується ознайомитись з рішеннями аналогічних задач, які наведені в [4].

У топках парових котлів при спалюванні палива утворюються оксиди азоту двох типів – оксид NO і діоксид NO_2 , причому на виході з димарів оксид NO складає до 95 % суми оксидів $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$. Окислення NO до NO_2 відбувається в процесі розповсюдження продуктів згорання палива в атмосфері. Тому розрахунки концентрацій оксидів азоту здійснюються за NO_2 .

У топках котельних агрегатів *при спалюванні всіх видів палива* утворюються оксиди азоту трьох видів: паливні, термічні і «швидкі».

Паливні – утворюються при температурі газового середовища 800 – 2200°C за рахунок окиснення азоту, що входить до складу палива (N^p).

Термічні – утворюються при високих температурах факелу (більше 1540°C) за рахунок окиснення молекулярного азоту, що входить до складу дуттєвого повітря.

«Швидкі» – утворюються при контакті вуглеводневих з'єднань палива з азотом повітря, що надходить в пальники, в початковій зоні факелу при відносно невисоких температурах (400 – 600°C).

4.2.1.1. Розрахунок сумарної концентрації оксидів азоту

Оскільки механізм утворення паливних, термічних і «швидких» оксидів азоту різний, то в процесі рішення задачі необхідно визначити концентрацію кожного з них і потім підсумувати.

При спалюванні твердого і рідкого палив концентрація оксидів азоту, мг/м^3 , визначається за формулою

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^p + \text{NO}_2^n + \text{NO}_2^w, \quad (4.1)$$

де NO_2^p – концентрація термічних оксидів азоту, мг/м^3 ;

NO_2^n – концентрація паливних оксидів азоту, мг/м^3 ;

NO_2^w – концентрація «швидких» оксидів азоту, мг/м^3 .

При спалюванні природного газу у зв'язку з відсутністю в ньому паливного азоту сумарна концентрація оксидів азоту, мг/м^3 , становить:

$$\text{NO}_2 = \text{NO}_2^p + \text{NO}_2^w \quad (4.2)$$

У випадку, якщо необхідно визначити сумарну концентрацію оксидів азоту при відмінному від номінального навантаженні котельного агрегату, розрахунок концентрацій оксидів азоту, мг/м^3 , здійснюється за наступною формулою:

Таблиця 4.2 – Вихідні дані

Варіант	Тип, марка котельного агрегату	Родовище марка палива	q_f МВт/м ³	q_f МВт/м ³	a_f м	b_f м	$t_{гв}$ °С	α_t	$\Delta\alpha_t$	$T''_{з,к}$	$\psi_{д.}$	$\alpha_{пр}$	B_1	Місце розташування тип та кількість пальників
01	E-500-13.8-560 ГМН (ТГМЕ-464)	Сірчанний мазут	0,228	3,55	7,68	13,5 2	272	1,03	0	1453	0,45	1,15	0,85	Задня стінка вихр. 8 шт.
02	E-420-13.8-560 ГМН (БКЗ-420-140-5)	Дашава-Київ, природ. газ	0,213	1,93	5,93	13,1 8	235	1,05	0,02	1483	0,44	1,17	0,87	Фронт. стінка вихр. 8 шт.
03	E-420-13.8-560 КТ (БКЗ-420-140-5)	Екібастузький СС	0,155	3,37	15,4 2	8,98	418	1,2	0,05	1463	0,45	1,16	0,9	Бокова ст. вихр. 8 шт.
04	Пп-1000-25-545 ГМ (ТГМП-314А)	Малосірчанний мазут	0,194	5,12	17,3	8,77	325	1,03	0,05	1453	0,44	1,14	0,89	Зустрічн. вихр. 8 шт.
05	E-320-13.8-560 КТ/ДТ (БКЗ-320-140-6)	Фрезерний торф	0,112	2,59	12,0 6	7,7	390	1,2	0,05	1223	0,42	1,15	0,86	Одно- фронт. вихр. 4 шт.
06	Пп-1000-25-545 К (ТГП-312А)	Донецький Г	0,155	4,86	17,2 3	8,72	384	1,15	0,05	1463	0,45	1,17	0,89	Зустрічн. вихр. 8 шт.
07	E-320-13.8-560 ГМ (БКЗ-320-140 ГМ-8)	Серед. Азія Центр природ. газ	0,248	4,19	11,8 2	5,45	246	1,05	0,02	1478	0,43	1,14	0,85	Фронт. вихр. 6 шт.
08	E-420-13.8-560 БТ (БКЗ-420-140-7)	Назаров-ське, БЗ	0,12	2,87	7,7	14,4 6	375	1,25	0,05	1373	0,42	1,16	0,87	Фронт. стінка вихр. 6 шт.
09	E-220-9.8-540 КБТ (БКЗ-220-100-9)	Донецький Д	0,15	3,26	9,34	6,73	381	1,2	0,05	1453	0,45	1,15	0,91	Зустр. бок. ст. вихр. 8 шт.
10	E-160-9.8-540 ГМ (БКЗ-160-100 ГМ-4)	Бухара-Урал природ. газ	0,314	3,78	4,49	7,1	228	1,05	0,02	1483	0,44	1,17	0,88	Боков. стін. вихр. 4 шт.

Продовження таблиці 4.2

Ва рі ант	Тип марка котельного агрегату	Родовище марка палива	q_v $\frac{м^3}{мгн}$	q_f $\frac{мВт}{м^3}$	a_T м	B_T м	$t_{г.в}$ °C	α_T	$\Delta\alpha_T$	T''_2 К	$\Psi_{г.г.}$	$\alpha_{пр}$	B_1	Місце роз- ташування тип та кількість пальників
11	E-140-8-500TM	Шебел.-Харків Природ.газ	0,158	3,21	5,5	7,0	342	1,1	0,05	1403	0,43	1,13	0,87	Бокова ст. Вихр 4шт.
12	E-140-8-500KT	Донецький АШ	0,158	3,21	5,5	7,0	387	1,2	0,05	1438	0,42	1,14	0,9	Бокова ст. Вихр 4шт.
13	E-220-9,8-570TM	Мазут M200	0,196	2,8	6,2	9,1	250	1,03	0,05	1433	0,44	1,17	0,84	12шт. вихр. задн. 2 яруса
14	Пп-1650-25-545/542 КТ (П-57Р)	Екбаст.	0,134	5,3	9,84	21,8	355	1,2	0,02	1464	0,42	1,16	0,87	24шт. вихр. бiчн. 2 яруса
15	E-420-13,8-560БЖ (БКЗ-420-140ПТ-2)	Ірша-Бородин. Б2	0,133	3,36	6,58	14,5	348	1,2	0,05	1385	0,43	1,16	0,88	8шт. шильова прямоточн
16	E-500-13,8-560КДТ (ТПЕ-430)	Донецький ДО	0,107	2,79	16,1	8,64	410	1,2	0,02	1420	0,45	1,17	0,85	8шт. Плоск.фр. Задн.ст.
17	Еп-670-13,8-545КДТ (ТПЕ-214А)	Кузнешький ГР	0,072	3,38	12,5	13,5	385	1,05	0,02	1415	0,43	1,16	0,88	8шт. Прямот.фр задн.ст.
18	Еп-670-13,8-545TMH (ПГМЕ-206)	Середня Азія Центр	0,255	3,74	18,0	7,68	232	1,03	0,02	1480	0,44	1,15	0,86	12шт. вихр. задн. 2 яруса
19	Пп-3050-25-545/542 ГМН	Природний газ Високосірчан. мазут	0,239	8,8	10,2 6	30,9	270	1,03	0,02	1450	0,45	1,16	0,89	56шт. вихр. фр. задн. стiн
20	E-210-13,8-560КБТ (БКЗ-210-140-9)	Печорський Марки Д	0,139	2,94	9,34	6,73	255	1,2	0,05	1450	0,44	1,14	0,85	Бокова ст. Вихр бiшт.

$$\text{NO}_2 = \left[\frac{D}{D_{\text{ном}}} \right] \text{NO}_2^{\text{рп}} + \left[\frac{D}{D_{\text{ном}}} \right]^{0,5} (\text{NO}_2^{\text{н}} + \text{NO}_2^{\text{ш}}), \quad (4.3)$$

де D – часткове навантаження котельного агрегата, що виражається в долях від $D_{\text{ном}}$.

4.2.1.2. Розрахунок концентрації термічних оксидів азоту

З метою спрощення математичного запису в формулах символ C_{NO_2} замінено на NO_2 .

При розрахунку концентрації термічних оксидів азоту $\text{NO}_2^{\text{рп}}$ визначальними параметрами є:

максимальна температура факела;

температурний інтервал реакції окиснення азоту, що входить до складу дуттьового повітря;

час перебування продуктів згорання в топковій камері.

Максимальна температура факела залежить від умовної адіабатичної температури в зоні горіння, K , яка визначається таким чином:

$$T'_a = \frac{Q'_t}{V_{\text{г}}^o C'_{\text{г}} + 1,061(\alpha_{\text{гор}} - 1)V_{\text{п}}^o C'_{\text{п}}}, \quad (4.4)$$

де Q'_t – тепловиділення в зоні горіння, кДж/кг (кДж/м³), яке визначається за формулою:

$$Q'_m = Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{гп}} + Q_{\text{пл}}, \quad (4.5)$$

де $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – нижча теплота згорання палива, кДж/кг (кДж/м³), визначається для заданого виду палива за даними [5];

$Q_{\text{гп}}$ – фізична теплота палива кДж/кг (кДж/м³), при розв'язанні задачі нею можна знехтувати, зважаючи на незначність;

$Q_{\text{пл}}$ – теплота, що вноситься гарячим повітрям у топку, кДж/кг (кДж/м³), яка визначається за формулою

$$Q_{\text{гв}} = (\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{т}} - \Delta\alpha_{\text{пл}}) \cdot I_{\text{гп}}^0 + (\Delta\alpha_{\text{т}} + \Delta\alpha_{\text{пл}}) \cdot I_{\text{хп}}^0 \quad (4.6)$$

де $\alpha_{\text{т}}$ – коефіцієнт надлишку повітря в топці (заданий, табл.4.2);

$\Delta\alpha_T$ – присмокть повітря в топку (заданий, табл.4.2);

$\Delta\alpha_{пл}$ – присмокти повітря в пилосистемі, при спалюванні твердих палив прийняти $\Delta\alpha_{пл} = 0,1$, при спалюванні природного газу і мазуту прийняти $\Delta\alpha_{пл} = 0$;

$I_{г.п}^0$ – ентальпія гарячого повітря, кДж/кг (кДж/м³);

$I_{х.п.}^0$ – ентальпія холодного повітря, кДж/кг (кДж/м³).

З метою спрощення розрахунку і у зв'язку з невеликою кількістю теплоти, що вноситься присмоктаним холодним повітрям, другою складовою частинною рівняння (4.6) можна знехтувати.

V_r^0 – теоретичний об'єм продуктів згорання палива при $\alpha=1$, м³/кг (м³/м³), визначається за даними [5];

V_p^0 – теоретичний об'єм повітря, необхідного для повного згорання палива при $\alpha = 1$, м³/кг (м³/м³); визначається за даними [5];

$\alpha_{гор}$ – коефіцієнт надлишку повітря в зоні горіння, який визначається за формулою:

$$\alpha_{гор} = \alpha_T - 0,5\Delta\alpha_T, \quad (4.7)$$

для газошільних котлів $\alpha_{гор} = \alpha_T$.

Ентальпія гарячого повітря, кДж/кг (кДж/м³):

$$I_{г.в.}^0 = V_v^0 \cdot C'_v \cdot t_{г.в.} \quad (4.8)$$

Середні теплоємності продуктів згорання палива і повітря можуть бути визначені за даними табл. III [5] при попередньому заданні значень адіабатичної температури горіння t_a і $t_{г.в.}$, °С, або за допомогою наступних залежностей:

- теплоємність продуктів згорання при спалюванні твердого палива, кДж/м³ К :

$$C'_T = (1,59 + 0,004W^H) + 0,14K_t \quad ; \quad (4.9 \text{ а})$$

- теплоємність продуктів згорання при спалюванні мазуту, кДж/м³ К :

$$C'_T = 1,58 + 0,122K_t \quad ; \quad (4.9 \text{ б})$$

- теплоємність продуктів згорання при спалюванні природного газу, кДж/м³ К :

$$C'_t = 1,57 + 0,134 K_t \quad ; \quad (4.9 \text{ в})$$

- теплоємність повітря, кДж/м³ К :

$$C'_n = 1,46 + 0,092 K_t . \quad (4.9 \text{ г})$$

У формулах (4.9а) – (4.9г) W^n – приведена вологість палива, % кг/кДж, яка визначається таким чином:

$$W^n = \frac{W^p}{Q_n^p} , \quad (4.10)$$

де W^p – вологість твердого палива, %, визначається за даними [5];

K_t – коефіцієнт, що враховує залежність теплоємності від температури:

$$K_t = \frac{t_a - 1100}{1000} , \quad (4.11)$$

де t_a – очікувана адіабатична температура горіння, °С, яка може бути визначена за наступними залежностями:

- при спалюванні твердого палива:

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{\text{гор}}} \cdot \left(1 + Q'_t \cdot 10^{-5} \right) ; \quad (4.12 \text{ а})$$

- при спалюванні мазуту і природного газу:

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{\text{гор}}} \cdot \left(1 + 0,36 \cdot Q'_t \cdot 10^{-5} \right) . \quad (4.12 \text{ б})$$

У першому наближенні замість Q'_t слід підставляти у формули (4.12 а) і (4.12 б) нижчу теплоту згорання палива Q_n^p .

Після знаходження умовної адіабатичної температури горіння за формулою (4.4) необхідно порівняти його з одержаним за формулами (4.12 а) або (4.12 б) значенням $T_a = t_a + 273$. Якщо розбіжність перевищує 50 К (50°С), то слід задатись новим значенням T_a і уточнити значення теплоємностей продуктів згорання палива і повітря.

Максимальна температура факела в зоні горіння палива, K , з урахуванням відводу теплоти до екранів, ступеня вигорання палива і впливу рециркуляції продуктів згорання визначається за формулою

$$T_M = \beta_{зг} \cdot T'_a \cdot (1 - \psi_{зг})^{0,25} \cdot (1 - r^{1+nr}) \cdot m_T, \quad (4.13)$$

де $\beta_{зг}$ – частка згорілого палива в зоні горіння, для твердих палив $\beta_{зг} = 0,95-0,97$ (більше значення для високореакційного палива ($V_r > 28\%$)), для природного газу і мазуту $\beta_{зг} = 0,97-0,99$;

$\psi_{зг}$ – коефіцієнт теплової ефективності екранів в зоні ядра факелу (заданий, табл. 4.2);

r – коефіцієнт рециркуляції продуктів згорання в зону горіння (вибирається залежно від умови задачі);

n – коефіцієнт, що враховує спосіб введення газів рециркуляції в топку:

$n = 6,5$ – при введенні газів через сопла під пальниками;

$n = 5,0$ – при введенні газів через кільцевий канал навколо пальника;

$n = 3,0$ – при змішуванні газів з гарячим повітрям до пальника, або при введенні між центральним і периферійним каналами пальника.

Оскільки найбільш ефективним є введення газів через кільцевий канал навколо пальника, то в розрахунку слід прийняти $n = 5,0$.

m_T – коефіцієнт, що враховує тип пальника:

$m_T = 1$ – для вихрових настінних пальників;

$m_T = 0,95 \cdot (25 / W_b)^{0,2}$ – для прямооточних настінних пальників,

де W_b – швидкість руху повітря на виході з пальника, м/с (звичайно $W_b = 35 - 40$ м/с);

$m_T = 0,985$ – для подових пальників з прямооточно-вихревою подачею повітря.

Теоретичний час досягнення рівноважної концентрації оксидів азоту NO при максимальній температурі факелу T_M визначається за формулою, с:

$$\tau_0 = 0,024 \exp(54290 / T_M - 23). \quad (4.14)$$

Розрахунковий час реакції утворення оксидів азоту в топці, с:

$$\tau_P = \frac{\Delta T_p}{T'_a - T''_T} \cdot \left(\frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \cdot \tau_{пероб}, \quad (4.15)$$

де ΔT_p – температурний інтервал реакції утворення оксидів азоту, К, визначається за формулою

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0,614 + T_m \cdot 10^{-5}}; \quad (4.16)$$

q_f – теплова напруга перетину топкової камери, МВт/м², (задана в табл. 4.2);

Π – розрахунковий периметр топкової камери, м, який знаходиться таким чином:

$$\Pi = 2a_T + 2b_T; \quad (4.17)$$

де a_T і b_T – глибина і ширина топки, м (див. табл. 4.2);

T_r'' – абсолютна температура газів на виході з топки, К, яка береться з теплового розрахунку котла (задана, табл. 4.2).

Слід врахувати, що при рециркуляції продуктів згорання палива в топку котла температура T_r'' зменшується орієнтовно пропорційно коефіцієнту рециркуляції r : збільшення r на 0,01 призводить до зниження T_r'' на $(6 \div 8)$ К.

Оскільки в таблиці 4.2 T_r'' задана при $r = 0$, то при $r > 0$:

$$T_r'' = T_r'' - r \cdot 10^2(6 \div 8); \quad (4.18)$$

$\tau_{\text{пероб}}$ – час перебування продуктів згорання в топковій камері, с, який визначається за формулою

$$\tau_{\text{пероб}} = \frac{273 \cdot \xi}{q_v \cdot \overline{T}_r \cdot g_r^n \cdot \alpha_T \cdot (1 + r)}, \quad (4.19)$$

де – q_v теплова напруга топкового об'єму, МВт/м³. У нашому випадку величина q_v задана (див. табл. 4.2);

\overline{T}_r – середня температура газів в топковій камері, К, яка розраховується за формулою

$$\overline{T_r} = 0,84 \left[(T_M)^4 + (T_r'')^4 \right]^{0,25}; \quad (4.20)$$

ϑ_r^n – питомий приведений об’єм газів при $\alpha = 1$, м³/МДж, який приймається рівним:

- для антрациту і напівантрациту $\vartheta_r^n = 0,273$ м³/МДж,
- для інших видів твердого палива $\vartheta_r^n = 0,278 + 0,001W^n$, м³/МДж,
- для мазуту $\vartheta_r^n = 0,281$ м³/МДж,
- для природного газу $\vartheta_r^n = 0,3$ м³/МДж;

ξ – коефіцієнт заповнення перетину топки потоком газу, який приймається рівним:

- при зустрічному розташуванні вихрових пальників $\xi = 0,8$;
- при однофронтальному розташуванні пальників $\xi = 0,75$;
- при тангенціальному розташуванні пальників $\xi = 0,7$;
- для подових пальників $\xi = 0,9$.

Концентрація термічних оксидів азоту, мг/м³, визначається за наступною залежністю:

$$NO_2^{mp} = 7,03 \cdot 10^6 C_{O_2}^{0,5} \cdot \exp(-10860/T_M) \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (4.21)$$

де C_{O_2} – концентрація залишкового (надмірного) кисню в зоні реакції, кг/м³, яка визначається за формулою:

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot V_B^0 \cdot [(\alpha_{гор} - 1) + r \cdot (\alpha_{рц} - \alpha_{гор})] \cdot \rho_{O_2}}{[V_r^0 + (\alpha_{гор} - 1) \cdot V_B^0] \cdot (1 + r)}, \quad (4.22)$$

де $\alpha_{рц}$ – коефіцієнт надлишку повітря в газах рециркуляції (табл. 4.2);

ρ_{O_2} – густина кисню за нормальних фізичних умов $\rho_{O_2} = 1,428$ кг/м³.

У тих випадках, коли різниця $(\alpha_{гор} - 1)$ є меншою, ніж 0,02, необхідно приймати її рівною 0,02.

4.2.1.3. Розрахунок концентрації паливних і «швидких» оксидів азоту

Запропонована методика розрахунку дозволяє *при спалюванні твердого палива і мазуту* визначити сумарну концентрацію вищезгаданих оксидів азоту, при цьому інтенсивність утворення їх істотно залежить від температурного рівня в топковій камері.

При температурах газів, що знаходяться в діапазоні $1850\text{ K} < T_M < 2200\text{ K}$ розрахункова формула для концентрації оксидів азоту, мг/м^3 , має вигляд:

$$\text{NO}_2^{\text{мл}+\delta} = 10^3 \cdot (0,4 - 0,1 \cdot N^p) \cdot N^p \cdot \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \cdot \left(\frac{2200 - T_M}{125} \right)^{0,33}. \quad (4.23)$$

При $800\text{ K} < T_M < 1850\text{ K}$ розрахункова формула для концентрації оксидів азоту, мг/м^3 , має вигляд:

$$\text{NO}_2^{\text{мл}+\delta} = 1,25 \cdot 10^3 \cdot (0,4 - 0,1 N^p) \cdot N^p \cdot \left(\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_M - 800}{1000} \right)^{0,33}. \quad (4.24)$$

Тут N_p – вміст азоту в паливі, %.

4.2.1.4. Особливості розрахунку концентрацій оксидів азоту при спалюванні природного газу

Спалювання природного газу характеризується більш швидким протіканням реакцій горіння. В результаті цього скорочується зона активного горіння палива і тому (за інших рівних умов) концентрація оксидів азоту при спалюванні газоподібного палива дещо вища, ніж при спалюванні твердого палива і мазуту (приблизно на 30 %).

При розрахунку концентрації термічних оксидів азоту, що утворюються при спалюванні природного газу, у формулу (4.25) необхідно замість T_M підставити $T'_M = 1,01 \cdot T_M$ з метою врахування підвищеної швидкості горіння палива.

При спалюванні природного газу за відсутності паливного азоту можуть утворюватись тільки «швидкі» оксиди азоту у зв'язку з наявністю вуглеводневих з'єднань. Концентрація «швидких» оксидів азоту, мг/м^3 , визначається при цьому за формулою:

$$\text{NO}_2^\delta = 10^2 \left[\frac{\alpha_{\text{гор}} + r}{1 + r} \right]^2 \left[\frac{T'_m - 800}{1000} \right]^{0,33}. \quad (4.25)$$

4.2.1.4. Особливості розрахунку концентрацій оксидів азоту при ступінчатому спалюванні палива

При двоступінчатому (нестехіометричному) спалюванні палива у зв'язку із зменшенням коефіцієнта надлишку повітря нижче за його стехіометричне значення температура факелу в першій (нижній) зоні горіння знижується. Подача збідненої паливно-повітряної суміші в другу (верхню) зону горіння з метою виключення неповноти згорання палива практично не впливає на температурний рівень у топці котла і генерація оксидів азоту стає істотно меншою в порівнянні з одноступінчатим спалюванням палива. Тому для визначення концентрації NO_x розрахунок температури факелу T_m виконується за формулою (4.13) при заміні в ній частки згорілого палива $\beta_{\text{ст}}$ на $\beta'_{\text{ст}} = 0,95\alpha'_{\text{гор}}$, де $\alpha'_{\text{гор}}$ – коефіцієнт надлишку повітря в пальниках першої зони, який визначається за формулою:

$$\alpha'_{\text{гор}} = \frac{\alpha_{\text{т}} - 0,5\Delta\alpha_{\text{т}} - \beta_{\text{н}}}{B_1}, \quad (4.26)$$

де $\beta_{\text{н}}$ частка повітря, що надходить у другу (верхню) зону горіння палива, в задачі для всіх видів палива $\beta_{\text{н}} = 0,21$;

\overline{B}_1 – частка палива, що надходить у першу зону горіння, задана в таблиці 4.2.

При цьому адіабатична температура горіння T'_a визначається за формулою (4.4) для повного коефіцієнта надлишку повітря $\alpha_{\text{гор}}$.

Розрахунок концентрації залишкового кисню в зоні реакції C_{O_2} здійснюється за формулою (4.22) із заміною в ній $\alpha_{\text{гор}}$ на $\alpha'_{\text{гор}}$. У випадку, якщо різниця ($\alpha'_{\text{гор}} - 1$) є меншою, ніж 0,02, або стає від'ємною величиною, то вона приймається рівною 0,02.

В іншому випадку методика розрахунку аналогічна варіанту одноступінчатої технології спалювання палива в котлі.

Задача 2

1. Для твердого палива:

Визначити температуру точки роси при спалюванні палива у паровому котлі; долю виносу золи із газами прийняти $\alpha_{\text{ун}} = 0,95$ – для топок з твердим шлаковидаленням та $\alpha_{\text{ун}} = 0,8$ – для топок з рідким шлаковидаленням.

2. Для малосірчаного, сірчаного та високосірчаного мазуту:

Визначити концентрацію SO_2 , температуру крапки роси та масовий викид SO_2 при спалюванні палива у паровому котлі та відносному навантаженні (1; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5) N_0 .

Вихідні дані до задачі 2 приведені в таблиці 4.3.

4.2.2. Методичні вказівки до задачі 2

Методичні вказівки:

Рішення задачі 2 слід починати тільки після вивчення матеріалу теми 3.1. При цьому рекомендується ознайомитись з рішеннями аналогічних задач, які приведено в [4].

4.2.3.1. Розрахунок утворення оксидів сірки і температури точки роси продуктів згорання при спалюванні мазуту і твердих палив

Діоксид SO_2 і триоксид SO_3 утворюються в зоні горіння мазуту і твердих палив, що містять зв'язану сірку S^p . При спалюванні природного газу утворення оксидів сірки може мати місце в незначній кількості за наявності в паливі сірководню H_2S .

4.2.3.2. Утворення оксидів сірки і розрахунок температури точки роси при спалюванні мазуту

1. Об'ємна частка діоксиду сірки в продуктах згорання:

$$r_{\text{SO}_2} = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{\Gamma}} = \frac{2 \cdot S^p}{100 \cdot \rho_{\text{SO}_2} \cdot V_{\Gamma}} = \frac{0,007 \cdot S^p}{V_{\Gamma}}, \quad (4.28)$$

де S^p – вміст сірки в робочій масі палива % (визначається за даними [7] залежно від родовища, марки і класу палива);

$\rho_{\text{SO}_2} = 2,86 \text{ кг/м}^3$ – питома густина діоксиду сірки;

$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + (\alpha_{\Gamma} - 1) \cdot V_{\Pi}^0$ – об'єм газів за нормальних умов, м³/кг;

V_{Γ}^0 – теоретичний об'єм продуктів згорання палива при $\alpha = 1$, м³/кг;
(м³/м³), визначається за даними [5];

V_{Π}^0 – теоретичний об'єм повітря, яке необхідне для повного згорання палива при $\alpha = 1$, м³/кг; (м³/м³), визначається за даними [5].

Таблиця 4.3 – Вихідні дані до задачі 2

Вариант	Тип, марка котельного агрегату	Родовище марка палива	$q_v, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$	$q_f, \frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$	$a_T, \text{м}$	$V_T, \text{м}^3$	$t_{г.в}, ^\circ\text{C}$	α_T	$\Delta\alpha_T$
01	E-500-13,8-560 ГМН	Мазут	0,228	3,55	7,68	13,5 ₂	272	1,03	0
02	E-420-13,8-560 ГМН	Мазут	0,213	1,93	5,93	13,1 ₈	235	1,05	0,02
03	E-420-13,8-560 КТ	Екібастуз. СС	0,155	3,37	15,42	8,98	418	1,2	0,05
04	Пп-1000-25-545ГМ	Мазут	0,194	5,12	17,3	8,77	325	1,03	0,05
05	E-320-13,8-560 КТ/ДТ	Фрезерний торф	0,112	2,59	12,06	7,7	390	1,2	0,05
06	Пп-1000-25-545К	Донецький Г	0,155	4,86	17,23	8,72	384	1,15	0,05
07	E-320-13,8-560 ГМ	Мазут	0,248	4,19	11,82	5,45	246	1,05	0,02
08	E-420-13,8-560 БТ	Назаров. Б2	0,12	2,87	7,7	14,4 ₆	375	1,25	0,05
09	E-220-9,8-540 КБТ	Донецький Д	0,15	3,26	9,34	6,73	381	1,2	0,05
10	E-160-9,8-540 ГМ	Мазут	0,314	3,78	4,49	7,1	228	1,05	0,02
11	E-140-8-500ГМ	Мазут	0,158	3,21	5,5	7,0	342	1,1	0,05
12	E-140-8-500КТ	Донецьк. АПШ	0,158	3,21	5,5	7,0	387	1,2	0,05
13	E-220-9,8-570ГМ	Мазут М200	0,196	2,8	6,2	9,1	250	1,03	0,05
14	П-57Р	Екібаст. СС	0,134	5,3	9,84	21,8	355	1,2	0,02
15	E-420-13,8-560БЖ	Ірша-Борол.Б2	0,133	3,36	6,58	14,5	348	1,2	0,05
16	E-500-13,8-560КДТ	Донецьк.ДЮ	0,107	2,79	16,1	8,64	410	1,2	0,02
17	Еп-670-13,8-545КДТ	Кузнецьк.ГР	0,072	3,38	12,5	13,5	385	1,05	0,02
18	Еп-670-13,8-545ГМН	Мазут	0,255	3,74	18,0	7,68	232	1,03	0,02
19	ТГМП-1202	Мазут	0,239	8,8	10,26	30,9	270	1,03	0,02
20	E-210-13,8-560КБТ	Печорськ. Д	0,139	2,94	9,34	6,73	255	1,2	0,05

2. Вміст надмірного (залишкового) кисню після згорання палива:

$$O_2 = \frac{21 \cdot (\alpha_T - 1) \cdot V_{\Pi}^0}{V_T} \quad (4.29)$$

3. Процентний вміст SO_3 в продуктах згорання визначається за формулою:

$$SO_3 = 100 \cdot k_p \cdot k_H \cdot r_{SO_2} \cdot O_2^{0,5}, \quad (4.30)$$

де k_p – константа рівноваги при утворенні SO_3 в топках, приймається за значенням температури газів на виході з топки. В області температур 1200÷1500 К (927÷1227 °С) константа рівноваги практично є постійною і становить $k_p = 0,053$;

k_H – коефіцієнт нерівномірності процесу утворення SO_3 , який залежить від нерівномірності концентрації газових компонентів в перетині топки і короткочасності перебування газів в топковому об'ємі; значення k_H залежить від теплової напруги перетину топки і знаходиться за формулою

$$k_H = 0,08 \cdot q_f \quad (4.31)$$

номінальна теплова напруга перетину топки, МВт/м², задана в таблиці 4.3.

У результаті формула (4.30) приводиться до наступного розрахункового вигляду:

$$SO_3 = 0,424 \cdot r_{SO_3} \cdot O_2^{0,5} \cdot q_f \cdot \left(\frac{N}{N_0} \right)^2, \quad (4.32)$$

де $\frac{N}{N_0}$ – відносне навантаження парового котла.

4. Температура точки роси t_p газів залежно від концентрації SO_3 , %, визначається за формулами:

- при $SO_3 \leq 2 \cdot 10^{-3} \%$

$$t_p = 50 + 11 \cdot A_{SO_3}^{0,7}; \quad (4.33)$$

- при $SO_3 > 2 \cdot 10^{-3} \%$

$$t_p = 50 + 50 \cdot A_{SO_3}^{0,2}, \quad (4.34)$$

де $A_{SO_3} = SO_3 \cdot 10^4$ – коефіцієнт.

Слід зауважити, що рециркуляція газів в топкову камеру не робить помітного впливу на рівень виходу SO_3 .

5. Масова концентрація діоксиду SO_2 у відхідних газах, г/кг палива, становить:

$$g_{\text{SO}_2} = 10^3 \cdot (r_{\text{SO}_2} - 0,01 \cdot \text{SO}_3) \cdot V_{\Gamma} \cdot \rho_{\text{SO}_2} \cdot \frac{\alpha_{\Gamma}}{\alpha_{yx}}, \quad (4.35)$$

де $\alpha_{\Gamma}, \alpha_{yx}$ – коефіцієнти надлишку повітря в топці і на виході з котла.

Загальний вид рівняння для визначення коефіцієнта надлишку повітря у відхідних газах:

$$\alpha_{yx} = \alpha_{\Gamma} + \sum_{j=1}^n \Delta \alpha_i, \quad (4.36)$$

де $\Delta \alpha_i$ – присмокоти повітря для окремих поверхонь нагріву;
 i – індекс поверхні нагріву за ходом димових газів.

6. Масовий викид діоксиду сірки з котла в навколишнє середовище, г/с:

$$M_{\text{SO}_2} = B \cdot g_{\text{SO}_2}, \quad (4.37)$$

де B – витрата палива в котлі, кг/с, визначається за формулою

$$B = \frac{q_f \cdot (a_{\Gamma} \cdot \epsilon_{\Gamma})}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}}, \quad (4.38)$$

q_f – теплове напруження розрізу топкової камери, МВт/м², задано в табл.4.3;

$a_{\Gamma}, \epsilon_{\Gamma}$ – ширина та глибина топкової камери, м, задано в табл.4.3;

Q_{H}^{P} – нижча теплота згоряння палива.

4.2.3.3. Розрахунок температури точки роси при спалюванні твердих палив

У мінеральному складі твердих палив містяться лужні сполуки, які значною мірою нейтралізують оксиди сірки, що утворюють в топці котла тому залишковий вміст SO_3 у відхідних газах і температура точки роси залежать від зольності палива A^{P} . Звичайно в цьому випадку відразу визначають температуру точки роси:

$$t_{\text{P}} = t_{\text{кон}} \cdot 202 \cdot (S^n)^{0,33/1,23} \alpha_{\text{yh}}^{A^n}, \quad (4.39)$$

де S^n – приведенне до 1 МДж теплоти значення сірки в робочій масі палива %:

$$S^n = S^P / Q_H^P, \quad (4.40)$$

A^n – приведенне до 1 МДж теплоти значення золи в робочій масі палива, %:

$$A^n = A^P / Q_H^P \quad (4.41)$$

$t_{\text{кон}}$ – температура конденсації водяної пари, °С, яка визначається за термодинамічною залежністю температури насичення сухої пари від парціального тиску $P_{\text{H}_2\text{O}}$, МПа:

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = r_{\text{H}_2\text{O}} \cdot P, \quad (4.42)$$

де $P = 101,3$ кПа (1 кгс/см²), загальний тиск;

$r_{\text{H}_2\text{O}}$ – об'ємна частка трьохатомних газів визначається за формулою:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}}^H / V_{\Gamma}^H, \quad (4.43)$$

де $V_{\text{H}_2\text{O}}^H$ – об'єм водяної пари, м³/кг;

V_{Γ}^H – об'єм димових газів, м³/кг.

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^H = V_{\text{oH}_2\text{O}}^H + 0,0161 \cdot (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_0^H \quad (4.44)$$

$$V_{\Gamma}^H = V_{\text{RO}_2}^H + V_{\text{ON}_2}^H + V_{\text{H}_2\text{O}}^H + (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_0^H, \quad (4.45)$$

де α_{yx} – коефіцієнт надлишку повітря на виході з котла.

α_{yn} – частка виносу золи з топки газами.

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Загальні методичні вказівки	4
Список літератури	5
2. Програма і методичні вказівки до тем дисципліни	6
2.1. Вступ	6
2.2. Розділ 1. Технологічні і хімічні методи зниження викидів оксидів азоту	7
2.2.1. Утворення оксидів азоту при спалюванні енергетичних палив на ТЕС	7
2.2.2. Технологічні і режимні (топкові) методи зниження концентрацій оксидів азоту (C_{NO_x})	8
2.3. Очищення продуктів згорання палива від оксидів азоту	10
2.3.1. Метод селективного некаталітичного відновлення NO_x (СНКВ)	11
2.3.2. Метод селективного каталітичного відновлення NO_x (СКВ)	12
2.3.3. Методи неселективного каталітичного відновлення NO_x (НСКВ) і розкладання NO_x гетерогенними відновниками	13
3. Розділ 2. Зниження викидів оксидів сірки в атмосферу	15
3.1. Проблеми і завдання, що виникають при захисті навколишнього середовища від викидів сірчистих з'єднань	15
Методи сіркоочищення палив до їх використання в котлах	17
3.2. Сіркоочищення димових газів	17
3.2.1. Мокрі методи сіркоочищення	18
3.2.2. Мокро-сухі і сухі методи сіркоочищення	19
3.2.3. Каталітичні методи сіркоочищення димових газів	20
3.2.4. Методи, що дозволяють одночасно знижувати викиди оксидів азоту і діоксидів сірки	21
4. Контрольна робота	22

Навчальне видання

Програма, методичні вказівки та контрольні завдання до курсу «Захист навколишнього середовища в теплоенергетиці» для студентів спеціальності 7.090505 «Котли і реактори» усіх форм навчання

Укладачі: ГОНЧАРЕНКО Леонід Васильович
ТЮТЮНИК Лариса Іванівна

Відповідальний за випуск О. В. Єфімов
Роботу до друку рекомендував Ю. В. Шульгін

В авторській редакції

План 2010р., поз. 94/

Підп. до друку XX.XX.10. Формат 60х84 1/16. Папір офсет. №2.
Друк – ризографія. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 3,3.
Обл. – вид. арк. 3,0. Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ» 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Свідectво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.